



Licence Sciences et Techniques (LST).

GENIE CHIMIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

**Impact de la granulométrie et la composition chimique
du cru sur la consommation calorifique.**

Présenté par :

◆ **BOUGARNE Samia**

Encadré par :

◆ **Mr EL MANSSOURI HAMID (Société)**

◆ **Pr MISBAHI HOURIA (FST)**

Soutenu Le 07 Juin 2021 devant le jury composé de :

- **Pr MISBAHI HOURIA**

- **Pr SQALLI OUAF AE**

- **Pr EL GHADRAOUI ELHOUSSINE**

Stage effectué à LafargeHolcim Meknès

Année Universitaire 2020 / 2021

Remerciements

En premier lieu, je remercie le bon Dieu le Tout Puissant de m'avoir prêté vie, santé et volonté pour mener à terme ce modeste travail.

Ensuite, je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance et ma vive gratitude à Madame **MISBAHI HOURIA** pour son encadrement, sa disponibilité, ses encouragements et ses précieux conseils qui m'ont permis de mener jusqu'au bout ce travail.

Et, je ne peux absolument pas ne pas remercier mes parents pour leurs sacrifices, patience et encouragements ; pour leur soutien moral et pour le magnifique modèle de labeur et de persévérance qu'ils m'ont inculqué.

Puis, mes plus vifs remerciements vont aux membres du jury Pr. **Sqalli Ouafae** et Pr. **El Ghadraoui El Houssine** qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir évaluer ce travail et l'enrichir par leurs différentes remarques et observations.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur **HAMID EL MANSOURI** pour sa disponibilité, son accueil chaleureux, ses explications ainsi que ses qualités humaines et morales que j'ai toujours appréciées.

Merci à tous les enseignants de la FST de Fès et particulièrement le corps professoral de Licence génie chimique pour leur apport sur le plan cognitif et surtout pour la qualité de la formation.

Enfin, que toutes les personnes, qui m'ont apporté aide et soutien au cours de la réalisation de ce travail, soient sincèrement et profondément remerciés.

Table des matières

<i>Table des matières</i>	1
<i>Listes des figures</i> :.....	
<i>Liste des tableaux</i>	
<i>Liste des abréviations</i> :.....	

Introduction général	1
-----------------------------------	----------

Chapitre 1 : Présentation de l'organisme d'accueil et description du processus de fabrication du ciment.

1	Généralités sur LAFARGEHOLCIM :	2
1.1	LAFARGEHOLCIM groupe :	2
1.2	LAFARGEHOLCIM Maroc :	2
2	Historique de LafargeHolcim avant la fusion :	3
3	Historique de la fusion entre Lafarge et Holcim :	3
4	Présentation de LafargeHolcim Meknès :	4
4.1	Historique de LafargeHolcim Meknès :	4
4.2	Situation géographique :	4
4.3	Fiche technique de LafargeHolcim Meknès :	5
4.1	Organigramme de LafargeHolcim Meknès :	5
4.2	Présentation des services :	6
4.3	Produits fabriqués :	6
5	Processus de fabrication du ciment :	7
5.1	Généralités sur le ciment :	7
5.2	Processus de fabrication du ciment :	8
5.2.1	Etape 1 : Préparation des matières premières.....	8
5.2.2	Etape 2 : Production du clinker.....	12
5.2.3	Etape 3 : Mouture du ciment et expédition.....	13

Chapitre 2 : Impact de la composition chimique et la granulométrie du cru sur la consommation calorifique.

1	Présentation de la ligne de cuisson :	16
1.1	Tour Echangeur à Voie Sèche (EVS):.....	16
1.2	Décarbonatation :	16
1.3	Phase de cuisson :	16
1.4	Phase de la trempé :	17
2	Facteurs qui influencent la consommation calorifique :	18
2.1	Type de procédé utilisé :	18

2.2	Fiabilité de fonctionnement des lignes de cuisson:.....	18
2.3	Soufflage du refroidisseur:.....	18
2.4	Pertes thermiques :	18
2.5	Airs faux :	18
2.6	Phase liquide (PL) :.....	18
2.7	Fluorine :	19
2.8	Modules du cru :.....	19
2.8.1	Facteur de Saturation en Chaux (FSC) :.....	19
2.8.2	Module silicique (MS) :.....	20
2.8.3	Module aluminoferrique (MAF) :.....	21
2.8.4	Granulométrie du cru :.....	21

Chapitre 3 : Résultats et discussions

1	Type de procédé :.....	24
2	Fiabilité de fonctionnement des lignes de cuisson :.....	24
3	Soufflage du refroidisseur :.....	24
4	Diminution des pertes thermiques :.....	24
5	Minimiser les airs faux :	24
6	Optimisation de la phase liquide :.....	25
7	Optimisation du Taux de la fluorine :	25
8	Modules du cru :.....	25
9	Granulométrie du cru (partie économique) :.....	25

Conclusion générale.....	27
---------------------------------	-----------

Références bibliographiques :

Webographie :.....

Listes des figures :

Figure 1 : Activité et implantation de LH Maroc.....	3
Figure 2 : Activité et implantation de LH Maroc.....	4
Figure 3 : Fiche technique de LafargeHolcim	5
Figure 4 : Organigramme de LafargeHolcim Meknès.....	5
Figure 5 : Les EPI de travail.....	6
Figure 6 : Produits de l'entreprise.....	6
Figure 7 : Types du ciment.....	7
Figure 8 : Principaux composants du ciment.....	8
Figure 9 : Processus de fabrication du ciment.....	8
Figure 10 : Vue d'une carrière.....	9
Figure 11 : Concassage.....	9

Figure 12 : Hall de pré homogénéisation.....	10
Figure 13 : Broyeur Cru.....	11
Figure 14 : Description du broyage du cru.	11
Figure 15 : Silo d'homogénéisation.	12
Figure 16 : Poste de préchauffage.	12
Figure 17 : Schéma de l'opération de cuisson	12
Figure 18 : Four rotatif.	13
Figure 19: Refroidisseur.	13
Figure 20 : Silo de clinker.	13
Figure 21: Broyeur ciment (BK).....	14
Figure 22 : Machine d'ensachage.....	14
Figure 23 : Clinker obtenue.	17
Figure 24 : Etapes de cuisson du clinker.	17
Figure 25: Diagramme présentant la variation du FSC et la CC en fonction du temps.....	20
Figure 26: Diagramme de la variation de la CC et le MS en fonction du temps.....	20
Figure 27: Diagramme de la variation de la CC et du MAF en fonction du temps.....	21
Figure 28: Diagramme de la variation de la finesse cru en fonction du temps.	22
Figure 29: Diagramme de la variation de la CC en fonction du temps.	22
Figure 30 : Diagramme de la variation de la CC et la finesse cru en fonction du temps.....	23

Liste des tableaux

Tableau 1: Comparaison entre les coûts dans les deux cas.....	25
---	----

Liste des abréviations :

EVS	Echangeur à Voie Sèche
C2S	CaSiO ₄ (Silice bicalcique ou bélite)
C4AF	Ca ₄ Al ₂ FeO ₁₀ (Aluminoferrite tricalcique)
C3S	Ca ₃ SiO ₅ (Alite ou silicate tricalcique)
CC	Consommation Calorifique
CE	consommation électrique
LH	LafargeHolcim
SA	société anonyme
EPI	Equipement de protection Individuelle
CPJ	Ciment Portland Composé avec Ajouts
CPA	Ciment Portland Composé Artificiel
STEEC	Specific thermal energy consumption
SEEC	Specific consumption of electrical energy
C	CaO (chaux)
S	SiO ₂ (silice)
A	Al ₂ O ₃ (Aluminium)
F	FeO ₃ (Oxydes de fer)

Introduction générale

Suite à l'évolution continue du domaine des travaux publics et de construction, la fabrication du ciment a connu beaucoup de progrès durant les dernières années. En effet, plusieurs nouvelles unités de production de ciment ont été récemment implantées au Maroc.

Les cimenteries sont de grosses consommatrices d'énergie, l'industrie cimentière s'appuie sur un procédé de fabrication très consommateur d'énergie calorifique. En effet, l'étape cruciale de fabrication du ciment est la clinkérisation qui nécessite une quantité considérable de chaleur. Le clinker, formé du mélange argile-calcaire à une très haute température, est le principal constituant des ciments : la température de la réaction de clinkérisation est très élevée et peut atteindre 1450°C.

Pour cette raison, ces dernières années les cimenteries ont fait d'importants efforts pour réduire cette consommation et alléger les coûts de production avec des équipements moins énergivores. Mais cette évolution a créé des contraintes qui doivent être maîtrisées pour satisfaire les exigences de qualité et de productivité.

Dans cet objectif, mon stage traite le sujet de l'impact de la granulométrie du cru (matière première de la production du ciment) et de sa composition chimique sur la consommation calorifique (CC). L'étude que nous avons menée s'est focalisée sur les paramètres qui peuvent influencer cette énergie en évaluant l'effet de chaque paramètre sur la consommation calorifique et par la suite proposer des solutions permettant sa diminution. Le travail réalisé consiste à optimiser la granulométrie et la composition chimique du cru permettant de consommer le minimum d'énergie calorifique tout en gardant une bonne réactivité du clinker ainsi qu'une meilleure qualité du ciment.

Ce rapport sera articulé autour de trois chapitres :

Le chapitre 1 est dédié à la présentation de l'entreprise et à son processus de fabrication du ciment.

Le chapitre 2 est consacré à l'étude bibliographique des principaux paramètres influençant la consommation calorifique.

Le chapitre 3 est dédié à la proposition des actions correctives ou préventives appropriés afin de diminuer cette surconsommation

Chapitre 1

Présentation de l'organisme d'accueil et description du processus de fabrication du ciment.

1 Généralités sur LAFARGEHOLCIM :

LAFARGEHOLCIM groupe :

LafargeHolcim est le leader mondial des matériaux de construction et des solutions au service des maçons, constructeurs, architectes et ingénieurs du monde entier. Les opérations du groupe produisent du ciment, des granulats et du béton prêt à l'emploi qui est utilisés dans des projets de construction allant de logement et de petits projets locaux aux projets d'infrastructure les plus grands. Cette société mondiale est présente dans plus de 77 pays dans le monde.

LAFARGEHOLCIM Maroc :

LafargeHolcim Maroc est né en 2016 de la fusion de Lafarge ciments et Holcim Maroc, donnant naissance au leader national de la fabrication des matériaux de construction. Cette fusion est la plus importante opération financière réalisée par la Bourse des valeurs de Casablanca.

❖ Activités et implantations :

C'est à partir de 1912 que le ciment commençât à être utilisé au Maroc, d'abord pour certaines réparations, puis pour les constructions principalement à Casablanca. Les besoins en ciments ont été amplifiés.

C'est alors que fut décidée en 1913, l'implantation de la première cimenterie à Casablanca. L'accroissement des besoins nationaux en ciment a engendré l'extension de l'usine de Casablanca et la création de nouvelles unités.

Les cimenteries marocaines constituent un acteur majeur dans l'économie du Royaume. Actuellement, les principaux acteurs du ciment marocain sont au nombre de quatre : Lafarge- Holcim, Ciments du Maroc filiale du groupe Italien Italcementi, Asment Temara filiale du groupe Portugais Cimpor et finalement le dernier né 100% marocain, les Ciment de l'Atlas (CIMAT).

Les parts de marché sont réparties comme suit : Lafarge-Holcim (54.9%), Ciment du Maroc (23.9%), Ciments d'Atlas (14.5%), Asment Temara (6.7%). Sur le plan interne, les quatre grands consommateurs sont : Tanger-Tétouan (11.9%), Grand Casablanca (11.6%), Oriental (11.5%) et Marrakech Tensift Haouz (10%).



Figure 1 : Activité et implantation de LH Maroc.

2 Historique de LafargeHolcim avant la fusion :

Le groupe « Holcim », d'origine suisse, est un acteur majeur au niveau mondial dans la production du ciment, fondé en 1912. Le Groupe est aujourd'hui présent sur les 5 continents dans près de 70 pays et emploie près de 80.000 personnes.

En outre « Lafarge » est un groupe français de matériaux de construction fondé en France en 1833 qui produit et vend dans le monde entier principalement du ciment, des granulats et du béton prêt à l'emploi. Ses produits sont utilisés pour construire ou rénover des logements, bâtiments et infrastructures.

3 Historique de la fusion entre Lafarge et Holcim :

Le groupe français Lafarge et le suisse Holcim précisait dans leurs communiqués qu'ils ont décidé la création de la nouvelle société LafargeHolcim. Cette décision traduisait par des effets positifs tant pour les clients et les salariés que pour les actionnaires des deux groupes.

Le 7 avril 2014, les sociétés Holcim et Lafarge ont annoncé leur intention de procéder à leur rapprochement dans le cadre d'une fusion.

Le 10 juillet 2015, Holcim et Lafarge ont annoncé la finalisation de leur fusion et la création de LafargeHolcim.

4 Présentation de LafargeHolcim Meknès :

Historique de LafargeHolcim Meknès :

La cimenterie de Meknès se trouve au nord-est de la ville, qui avait comme nom : CADEM (ciments artificiels de Meknès) l'usine a démarré en 1953 avec une seule ligne de production à voie humide d'une capacité de 400 tonnes par jour.

L'usine de Meknès est la 2ème cimenterie du groupe Lafarge en terme de capacité, après celle de Bouskoura, et suivie par celle de Tétouan, de Tanger et d'El Jadida. Elle y occupe une position majeure grâce à sa situation géographique.

Situation géographique :

Situé à 8 Km au nord-est de la ville Meknès, Cette situation la met dans un contexte complexe, car l'usine est situé entre deux communes (Dkhissa –Ouislane où il y a approximativement 120 000 Habitants), un milieu sensible présentant un ensemble d'enjeux internes et externes, que l'usine gère en continu.

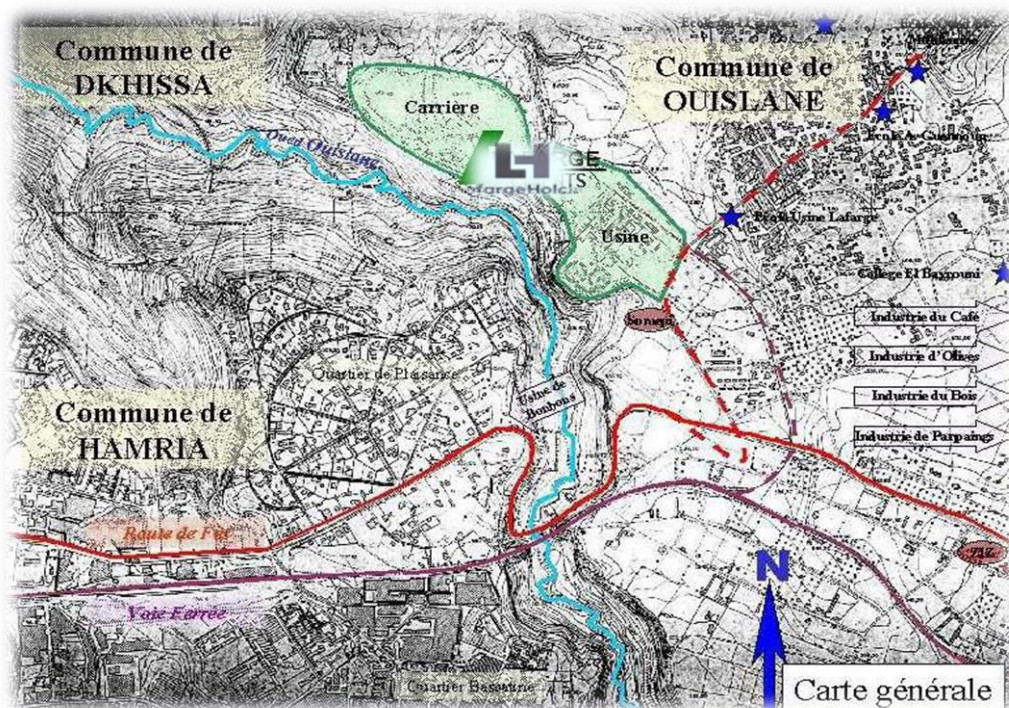


Figure 2 : Carte géographique de LH Meknès.

Fiche technique de LafargeHolcim Meknès :

La fiche technique ci-dessous présente les principales informations sur la société, du côté juridique.

SIGLE	 LafargeHolcim
RAISON SOCIAL	LAFARGEHOLCIM - Meknès
NATURE JURIDIQUE	Société Anonyme (SA)
CAPITAL	702.138.750 DHS
Produits fabriqués	Ciment portland avec ajout CPJ45 en sac et en vrac Ciment portland avec ajouts CPJ35 en sac
ADRESSE POSTALE	Km 8 Route De Fes Bp:233, Meknes, Fès
TELEPHONE	+212 5355-22644

Figure 3 : Fiche technique de LafargeHolcim

1. Organigramme de LafargeHolcim Meknès :

Le comité de direction de LafargeHolcim assure un suivi régulier et permanent de l'exploitation courante, des projets en cours des budgets et des aspects organisationnels. Et pour se faire la direction est subdivisée en plusieurs services comme le montre la figure suivante.

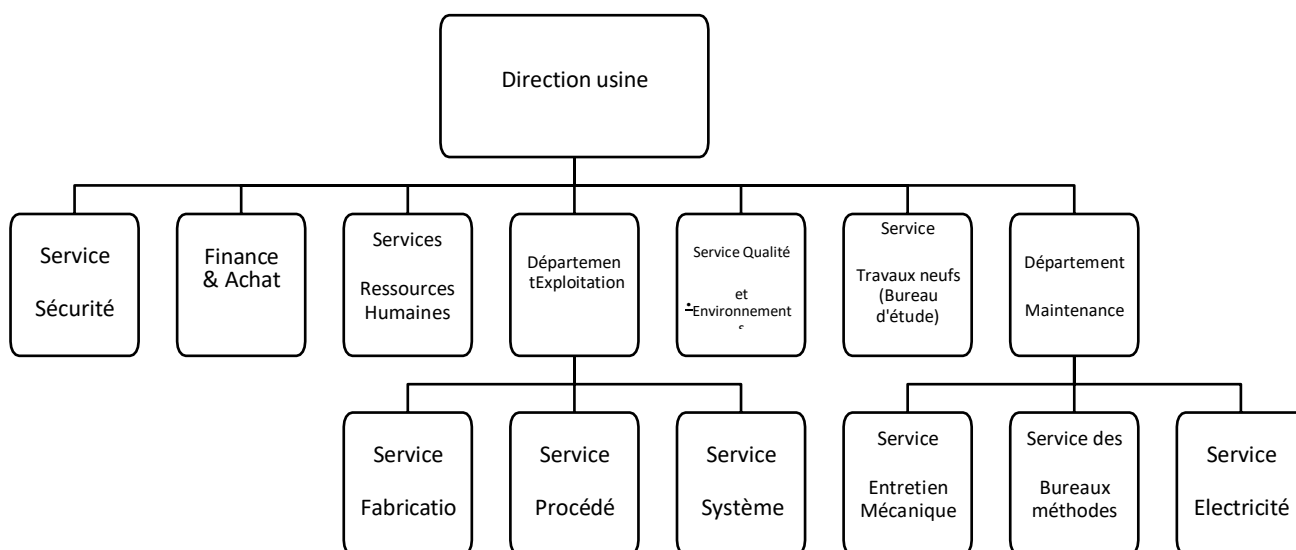


Figure 4 : Organigramme de LafargeHolcim Meknès

Présentation des services :

En partant de l'extraction des matières premières jusqu'à l'obtention du ciment, ce processus de fabrication nécessite l'existence de plusieurs services s'occupant chacun d'une ou plusieurs tâches.

- Service Carrière ;
- Service Fabrication ;
- Service Electrique et Régulation ;
- Service Commercial ;
- Service de Sécurité,
- Service de Finance-Gestion ;
- Services des Ressources Humaines ;
- Service d'Achat ;
- Service du Contrôle de Qualité ;
- Service Bureau d'Etudes.

La figure ci-dessus représente les Equipements de Protection Individuelle (EPI) imposée par le service de sécurité dont la mission est l'animation d'un comité de sécurité dans l'usine.

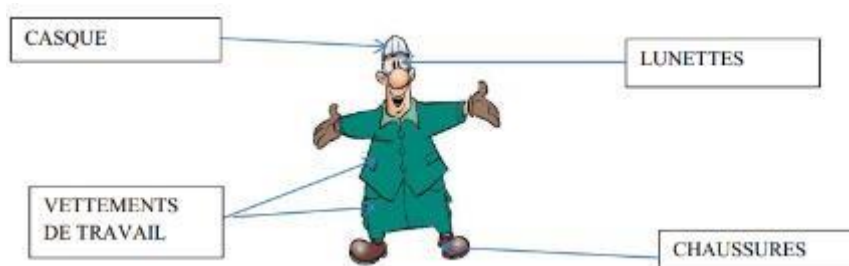


Figure 5 : Les EPI de travail

Produits fabriqués :

L'usine de Meknès est spécialisée dans la fabrication de trois types de ciment : le CPJ45, CPJ35 et CPA55 (figure 6).



Figure 6 : Produits de l'entreprise.

Le tableau 1 présente la composition de chaque catégorie du ciment :

Ciments			
Compositions	CPJ35	CPJ45	CPA55
Calcaire	35.60%	24.00%	0.00%
Cendres volantes	3.21%	6.52%	0.00%
Gypse	2.80%	3.14%	5.64%
Clinker	58.39%	66.34%	94.36%

Figure 7 : Types du ciment

5 Processus de fabrication du ciment :

Dans cette partie, nous allons citer le produit fabriqué « le ciment », sa définition, sa composition chimique puis nous lancerons le processus de fabrication, des matières premières aux étapes d'obtention du ciment.

Généralités sur le ciment :

Le ciment est une poudre minérale, d'aspect grisâtre, qui a la propriété de former en présence de l'eau, une pâte capable de faire prise et de durcir progressivement, même à l'abri de l'air, et notamment sur l'eau. C'est un Liant Hydraulique.

- Composition du ciment :

Le calcaire : c'est une roche sédimentaire carbonatée contient au moins 50% de calcite (CaCO_3), et peut être accompagnée d'un peu de dolomite, d'aragonite (carbonate de calcium cristallisé) et de sidérite (carbonate de fer naturel). Les calcaires sont de faible dureté et font effervescence.

Schiste : C'est une roche métamorphique, obtenue des sédiments (argiles, boues...), et qui a subi lors des différentes transformations géologiques, de fortes températures et de très grandes pressions.

Bauxite : une roche sédimentaire principalement composée d'hydroxydes d'aluminium [$\text{Al}(\text{OH})_3$], associée à des oxydes de fer et des impuretés (Silice, Calcite).

Minerai de fer : (Ferrite) est une roche contenant du fer, généralement sous la forme d'oxydes (Fe_2O_3).

Gypse : C'est des sulfates de calcium hydratés ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$), soluble dans l'eau, de

de faible dureté.



Figure 8 : Principaux composants du ciment.

Processus de fabrication du ciment :

La fabrication du ciment est un procédé complexe qui exige un savoir-faire, une maîtrise des outils et des techniques de production, et des contrôles rigoureux et continus de la qualité. Ce processus est divisé en 3 étapes :

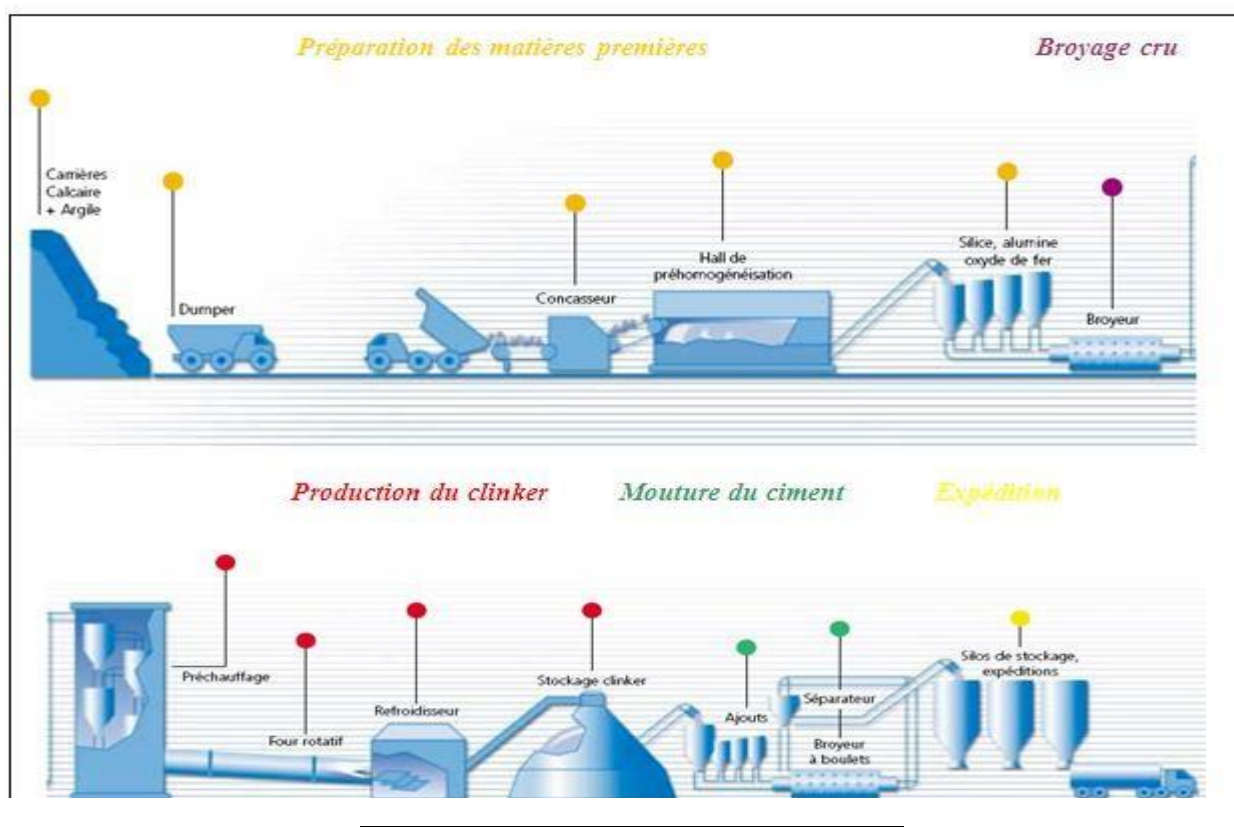


Figure 9 : Processus de fabrication du ciment.

5.8.1 Etape 1 : Préparation des matières premières.

❖ Exploitation de la carrière :

La carrière est la source de la matière première qui passe par plusieurs étapes de transformations afin d'obtenir le produit fini, le ciment.

L'extraction des roches se fait par abatage à l'explosif qui consiste à détacher la roche

à extraire du massif, en procédant par :

- Le forage: la préparation des trous de mines destinées à recevoir l'explosif ;
- La mise en place de l'explosif dans les trous. On procède par chargement de plusieurs trous

à la fois ;

- Le sautage, opération qui consiste à faire exploser simultanément toutes les charges explosives, de façon à obtenir l'arrachement de la pierre.



Figure 10 : Vue d'une carrière.

❖ Concassage :

Le concassage consiste à faire soumettre les matières premières à des efforts d'impacts, d'attrition, de cisaillement ou de compression pour réduire leurs dimensions, cette étape a pour but d'optimiser et de faciliter le stockage et la manutention des blocs extraits au niveau de la carrière.



Figure 11 : Concassage.

❖ Transporteur des matières premières :

Le transport et la manutention des matières premières sont assurés par des équipements de manutention et des engins mécaniques. Ceux-ci sont très importants lors des phases d'extraction et d'alimentation du concasseur et pour le transport des ajouts. Quant aux

équipements de manutention (bandes, aéroglesseurs, élévateurs...), ils sont utilisés après l'opération de concassage pour transporter les différentes matières entre les installations de l'usine.

❖ Pré homogénéisation :

Dans le but d'assurer à la matière première, dénommée en cimenterie par le cru, une composition chimique régulière, on assiste à une opération de pré homogénéisation.

Lors de la constitution des tas dans une station d'échantillonnage, des échantillons de cru sont prélevés, ces derniers sont analysés au niveau de laboratoire de l'usine et les résultats permettent de définir les corrections nécessaires à apporter au mélange de matières premières.



Figure 12 : Hall de pré homogénéisation.

❖ Broyage cru :

Le broyage du cru est une autre opération qui consiste à réduire la roche en une poudre très fine de taille micrométrique, la poudre fine obtenue, appelée la farine cru, est stockée dans des silos après avoir subi une homogénéisation afin d'obtenir une composition chimique régulière prête à la cuisson.

L'opération du broyage consiste à écraser la matière sur une piste munie d'un mouvement. La séparation des particules suffisamment broyées de celles nécessitant encore du broyage se fait à l'aide d'un séparateur placé au-dessus des galets.



Figure 13 : Broyeur Cru

❖ Dépoussiérage :

Le transport de la farine cru par des aéroglisteurs risque de générer des poussières. Le système de dépoussiérage consiste alors à éliminer les émissions des poussières par l'utilisation des manches ou des électro filtres (pour une meilleure protection de l'environnement).

❖ Homogénéisation :

Après broyage, le cru est expédié, à l'aide de deux élévateurs, vers un silo d'homogénéisation.

Cette homogénéisation permet d'alimenter les fours avec un cru de composition chimique constante dans le temps.

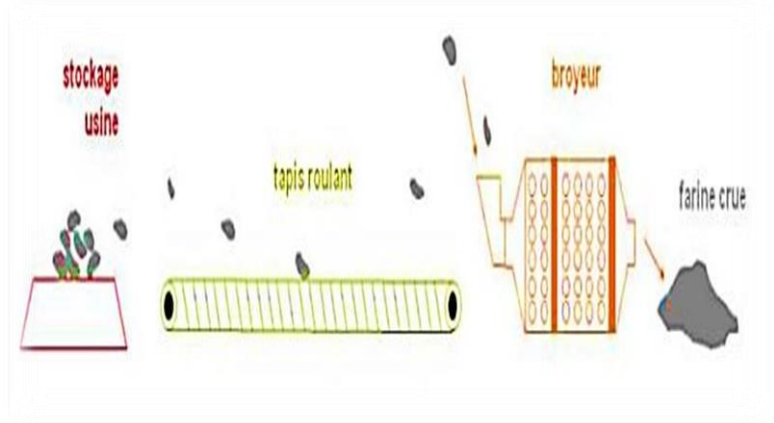


Figure 14 : Description du broyage du cru.



Figure 15 : Silo d'homogénéisation.

5.8.2 Etape 2 : Production du clinker.

❖ Préchauffage :

Le préchauffage permet essentiellement de préparer la farine du point de vue chimique et thermique. Cette préparation consiste à sécher, déshydrater et décarbonater partiellement la matière crue en réutilisant une partie de l'énergie calorifique évacuée par les gaz sortant du four.



Figure 16 : Poste de préchauffage.

❖ Cuisson :

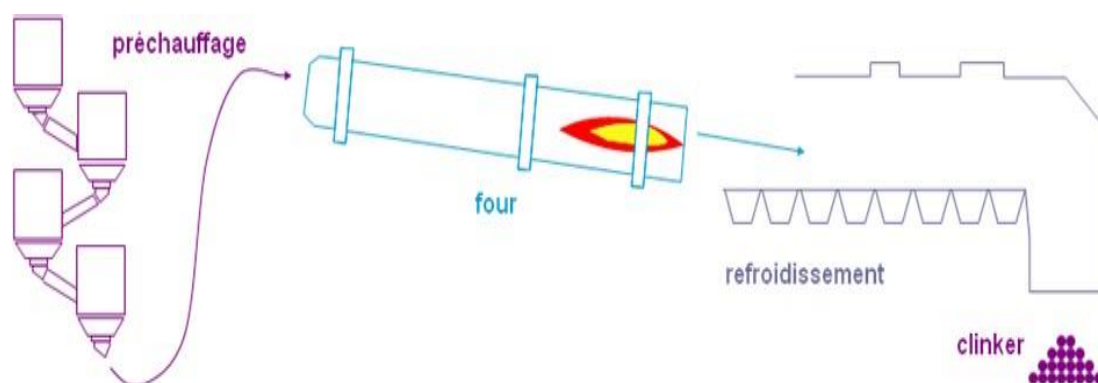


Figure 17 : Schéma de l'opération de cuisson

Pièce maîtresse de la cimenterie, le four est un tube en acier, légèrement incliné par rapport à son axe (3 à 5%) briqueté intérieurement, de 96 mètre de longueur, de 3,75 m de diamètre et d'une capacité de 1800 t/j. Dans le four, la matière préparée par l'échangeur subit deux transformations chimiques principales :

- La décarbonation : Commence dans la tour échangeur et se complète au début du four ;
- La clinckérisation : S'effectue à une température voisine de 1450°C quand la matière atteint la fin du four.



Figure 18 : Four rotatif.

❖ Refroidisseur :

Le rôle des refroidisseurs consiste à garantir la trempe du clinker pour avoir une structure minéralogique et des dimensions de cristaux favorables. Les refroidisseurs permettent aussi de baisser la température du clinker pour faciliter la manutention et le stockage.



Figure 19: Refroidisseur.

5.8.3 Etape 3 : Mouture du ciment et expédition.

❖ Silos de clinker :

Le clinker, issu du four, est stocké dans des silos qui d'une part, confèrent à l'atelier de broyage ciment (étape suivante) une autonomie de marche en cas d'arrêt intempestif du four et d'autre part, prémunit le clinker d'une dégradation physico-chimique que causerait un stockage prolongé à l'air libre.



Figure 20 : Silo de clinker.

❖ Broyage du ciment :

Le clinker et les ajouts, qui sont des matériaux grossiers par rapport à la granulométrie du ciment, sont introduits au niveau du broyeur, dans des proportions prédéfinies, pour subir des efforts mécaniques du broyage et produire ainsi le ciment qui est d'une finesse inférieure à 40 μm .



Figure 21: Broyeur ciment (BK)

❖ Expédition :

Les expéditions comprennent le stockage du ciment, son conditionnement (ensachage) en cas de livraison par sacs et son chargement. C'est l'interface de l'usine avec le client.



Figure 22 : Machine d'ensachage.

Conclusion :

Nous sommes arrivés à la conclusion que ce chapitre constitue le point de départ de notre projet de recherche, car il décrit en tant que première partie, l'organisation d'accueil, puis la deuxième partie introduit spécifiquement le processus de fabrication du ciment, ce qui nous permet d'acquérir des connaissances de base afin de développer des travaux appropriés, nous présentons par la suite une revue bibliographique sur les causes possibles qui impactent la surconsommation calorifique dont le but de proposer des solutions pour la problématique.

Problématique

Le processus de la cuisson du clinker nécessite une grande énergie calorifique (Température de réaction très élevée) ce qui engendre des dépenses énergétiques immenses pour la société. Pour surmonter ce problème, il est nécessaire d'optimiser l'énergie calorifique de l'atelier de cuisson et c'est pour cette raison que Lafarge-holcim a abordé un nouveau processus de fabrication (voie sèche) avec de nouvelles installations plus économes en énergie.

Notre travail cible en premier lieu l'évaluation de tous les paramètres influençant la consommation énergétique y compris la granulométrie du cru et sa composition chimique.

En deuxième lieu, il est nécessaire de déterminer l'effet de chacun des paramètres suivants sur la consommation calorifique : la nature de la matière première, la nature du combustible, les entrées d'air faux.... Et proposer par la suite des méthodes économiques et efficaces visant leur optimisation en préservant la bonne qualité du produit final et en allégeant ainsi la facture énergétique.

Chapitre 2 :

Impact de la composition chimique et la granulométrie du cru sur la consommation calorifique.

1 Présentation de la ligne de cuisson :

La ligne de cuisson recouvre toutes les étapes de transformation chimiques de la farine crue jusqu'à la formation du clinker par un apport thermique suffisant pour obtenir des réactions chimiques complètes, conduisant à l'élimination presque totale de chaux non combinée, en fait c'est la partie du processus qui nous intéresse.

A la cuisson, les composants du mélange cru se décomposent et se recombinent entre eux pour former de nouvelles phases minérales (ce sont les minéraux du clinker). L'écriture chimique de ces liaisons est simplifiée en utilisant :

C pour CaO (Chaux), le S pour SiO₂ (Silice), A pour Al₂O₃ (Alumine) et enfin le F pour symboliser Fe₂O₃ (oxyde de fer).

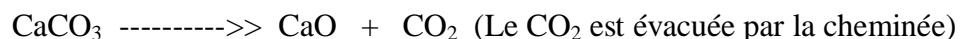
La ligne de cuisson est constituée de 4 principales étapes :

2.2 Tour Echangeur à Voie Sèche (EVS):

Afin d'améliorer le bilan thermique, un échangeur de chaleur est utilisé en amont du four pour préchauffer les matières premières à environ 900 °C. Puisque la méthode sèche est utilisée comme processus de fabrication, il sera équipé d'un échangeur à cyclone, qui peut fournir bon échange thermique, cet échange se fait entre l'air chaud du four (900°C) et la farine froide (60°C) circulant à contre-courant. Ce préchauffage permet de préparer thermiquement et chimiquement le matériau afin de réduire l'humidité de ce dernier.

2.2 Décarbonatation :

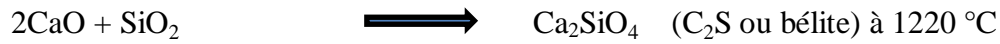
Le cru étant séché, il s'échauffe sans grande réaction chimique jusqu'à une température de l'ordre de 950 °C où intervient la décarbonatation de la phase calcaire :



2.2 Phase de cuisson :

Après avoir quitté la tour, la farine entre dans le four où elle subit la phase de transition la plus importante : la pince, phase qui débute de 1200 °C à 1450 °C et est endothermique de chaleur. Une partie des matières premières fond pour former une phase liquide (phase aluminat et ferrite).

Lors de la cuisson, il y a une étape de transformation des composants (phase de transition), la réaction de clinkérisation la plus importante se produit à l'état solide :



La matière sortante du four est le clinker, elle se présente sous forme des grains frits foncés, arrondis à surface irrégulière et dont le diamètre peut aller jusqu'à 3cm.



Figure 23 : Clinker obtenue.

2.2 Phase de la trempé :

A la sortie du four se trouve un refroidisseur, qui permet de refroidir brutalement la matière cuite à environ 100°C en quelques minutes en soufflant de l'air frais, on récupère le clinker, cette opération est destinée à congeler des minéraux instables à la température ambiante, en particulier C₃S, qui affectera les propriétés hydrauliques du clinker. Le refroidisseur remplit une autre fonction très importante, qui consiste à récupérer l'énergie thermique et à l'utiliser pour préchauffer les matières premières.

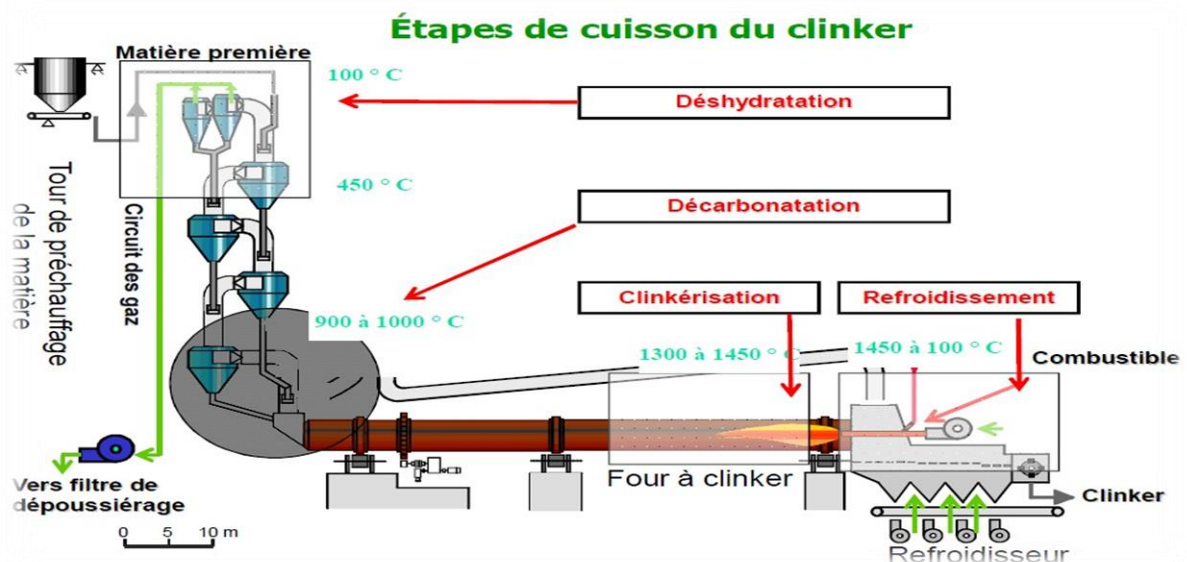


Figure 24 : Etapes de cuisson du clinker.

2 Facteurs qui influencent la consommation calorifique :

Afin de diminuer la consommation calorifique du four, il faut d'abord déterminer les paramètres qui influencent cette consommation. Elle dépend principalement des facteurs suivants :

2.1. Type de procédé utilisé :

La voie humide est utilisée depuis longtemps. C'est le procédé le plus ancien, le plus simple mais qui demande le plus d'énergie.

La voie sèche est la technique la plus employée, aujourd'hui, dans le monde. Elle est moins consommatrice d'énergie.

2.2. Fiabilité de fonctionnement des lignes de cuisson:

Des arrêts fréquents des lignes de cuisson, attribuables à des incidents, peuvent entraîner des surconsommations calorifiques importantes.

2.3. Soufflage du refroidisseur:

Pour refroidir le clinker d'environ 1500°C en entrée du refroidisseur à une valeur de 100°C en sortie, un flux d'air de refroidissement est nécessaire. Ce dernier dépend du débit de la farine brute introduite dans le four. Le ventilateur souffle de l'air de refroidissement dans la chambre de combustion et cet air traverse la couche de clinker. Si l'on divise la somme des débits d'air de refroidissement de tous les ventilateurs par le débit de clinker, on obtient le débit d'air de refroidissement, qui s'exprime en m³N/Kg CK (clinker).

2.4. Pertes thermiques :

En brûlant, le combustible dégage une énergie dont sa majeure partie est exploitée comme source d'énergie thermique du four. L'autre de cette énergie est perdue via la paroi du four.

2.5. Airs faux :

Cette prise d'air peut être expliquée par un problème d'étanchéité au niveau de la tour comme il peut que ces airs parasites se développent à cause des portes ouvertes et joints défectueux.

2.6. Phase liquide (PL) :

La phase liquide est principalement composée de fer et d'alumine et d'une petite quantité d'autres composés. La formule de calcul du pourcentage de phase liquide est la suivante :

$$PL = 3 \text{ AL}_2\text{O}_3 + 2,25 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$$

* Si le flux (AL₂O₃ et Fe₂O₃) est insuffisant, la phase liquide est également insuffisante, et le clinker est difficile à former, d'où une consommation de chaleur excessive ;

* Si le flux est élevé, il est facile de former un matériau mature, mais le MS sera faible.

2.7. Fluorine :

La fluorine CaF_2 joue le rôle d'un minéralisateur. Elle facilite la cuisson du cru ce qui permet d'alléger la consommation calorifique du four de cuisson.

- ✓ Lorsque le taux de la fluorine est faible, la cuisson est difficile ainsi qu'il y a une volatilisation des sulfates alcalins et des chlorures, ceci cause un collage au niveau des cyclones ce qui peut mener à un arrêt du four ;
- ✓ Lorsque le taux de la fluorine est élevé, la cuisson est facile et la CC diminue, mais il y a un collage de la matière sur les réfractaires du four.

2.8. Modules du cru :

Les modules empiriques du cru se calculent sur quatre composantes chimiques : CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 à partir de trois équations de référence : FSC, MS et MAF et qui seront expliquées par la suite.

2.8.1 Facteur de Saturation en Chaux (FSC) :

Le facteur de saturation en chaux mesure le taux de chaux nécessaire pour se compiler avec la silice, l'alumine et l'oxyde de fer et il est d'ailleurs le module le plus significatif dans la chimie du clinker puisqu'il regroupe tous les composants chimiques de la farine crue. Le FSC se mesure avec la formule suivante :

$$FSC = \frac{\%CaO}{2,8 * \%SiO_2 + 1,18 * \%Al_2O_3 + 1,68 * \%Fe_2O_3}$$

Le F.S.C idéal dans LafargeHolcim Meknès est de 99%.

- ✓ Si le F.S.C est élevé ($\gg 99$), on a :
 - Consommation calorifique élevée (cuisson difficile).
 - Augmentation de la teneur en chaux libre.
 - C_3S augmente (par conséquent résistance du ciment).
- ✓ Si le F.S.C est faible ($\ll 99$), on obtient :
 - Cru facile à cuire.
 - Faible consommation calorifique.
 - Faible teneur en chaux libre (en raison de l'excès de la phase liquide dans la zone de cuisson).
 - Baisse de C_3S et augmentation de C_2S . Il y a tendance à formation des boulets du clinker dans le four.

✓ Variation de la CC et de la FSC en fonction du temps :

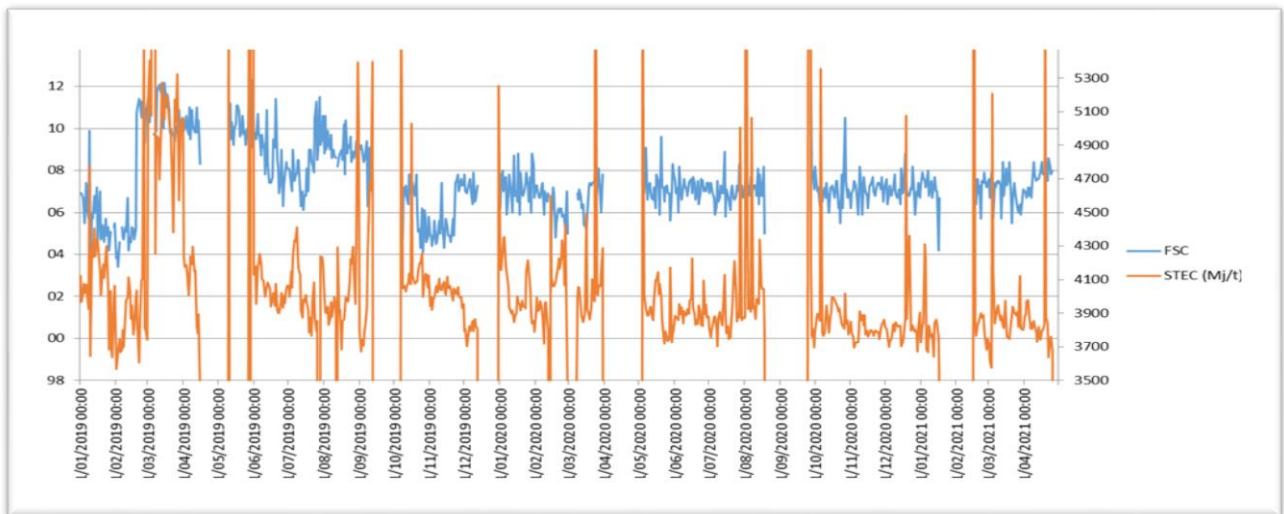


Figure 25: Diagramme présentant la variation du FSC et la CC en fonction du temps.

Interprétation :

D'après la figure, lorsque la FSC augmente, nous remarquons une surconsommation calorifique. L'augmentation du facteur de saturation en chaux indique une augmentation de chaux et ceci cause une difficulté de la cuisson du cru.

2.8.2 Module silicique (MS) :

Le module silicique mesure le taux de silice par rapport au taux d'oxydes de fer et d'aluminium ensemble.

$$MS = \frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3}$$

✓ Variation de la CC et de la MS en fonction du temps :



Figure 26: Diagramme de la variation de la CC et le MS en fonction du temps.

Interprétation :

Lorsque le module silicique augmente, la consommation calorifique du four augmente. Le module de silice élevé indique que la teneur en silice est élevée par rapport à la teneur en oxydes d'aluminium et de fer. Cela rendra difficile la cuisson de silice supplémentaire et augmentera donc l'énergie thermique nécessaire à la cuisson.

2.8.3 Module aluminoferrique (MAF) :

Sa valeur caractérise la nature de la phase fondue, contenant la presque totalité des deux oxydes Al_2O_3 et Fe_2O_3 .

- Quand MAF est faible, la viscosité de la phase fluide diminue ;
- Plus MAF est élevé Plus la proportion d'aluminate est grande, plus la phase liquide est visqueuse et plus la température de clinkérisation sera élevée et donc une difficulté de la cuisson.

$$MAF = \frac{\%Al_2O_3}{\%Fe_2O_3}$$

✓ Variation de la CC et de la MAF en fonction du temps :

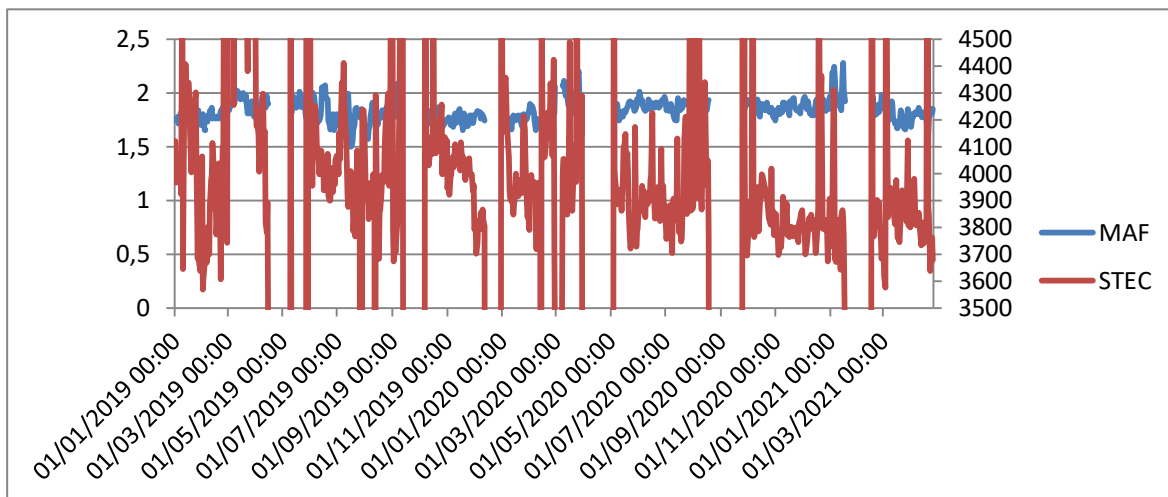


Figure 27: Diagramme de la variation de la CC et du MAF en fonction du temps.

Interprétation :

D'après la courbe, nous pouvons observer que le facteur (MAF) varie d'une manière lente ou qu'il y a une variation non remarquable, donc cela veut dire que l'usine de Meknès n'essaye pas de le varier car il n'a pas un impact important sur la consommation calorifique.

2.8.4 Granulométrie du cru :

La granulométrie ou la finesse du cru est un paramètre important de la chimie du cru, de la qualité du clinker et donc du ciment.

Pour traiter l'influence de la granulométrie du cru sur la CC nous avons étudié, durant les trois dernières années, la variation de la finesse cru en fonction de pourcentage des rejets ;

Le pourcentage des rejets constitue le pourcentage des grains de taille supérieure qui nécessite un broyage supplémentaire.

✓ Variation de la finesse du cru en fonction du temps :

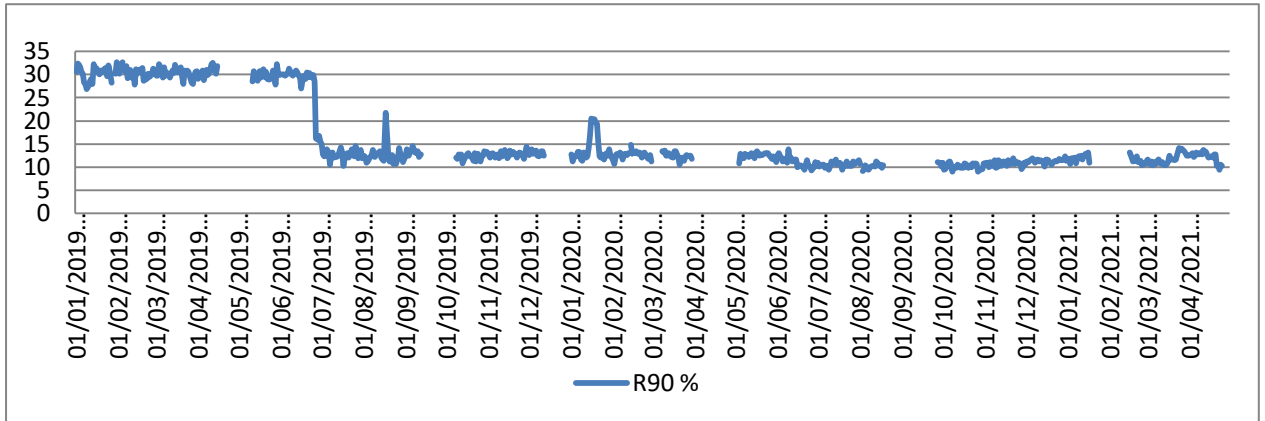


Figure 28: Diagramme de la variation de la finesse cru en fonction du temps.

Interprétation :

D'après la courbe d'évolution de la taille des particules de matière première, on observe que ce paramètre a diminué au cours des trois dernières années et s'est stabilisé de mai 2020 à avril 2021, on peut donc dire que l'usine de Meknès essaie de minimiser les rejets pour obtenir une farine crue à grains plus fins. Cette modification vise à améliorer les facteurs affectés par ce paramètre :

- R90% : le rejet à 90 μ m, c'est à dire la farine est à 90 μ m donc le pourcentage des rejets égal 10%.
- Dans le deuxième cas le pourcentage des rejets égaux 30% donc la farine est broyée à 70 μ m.

(30% de janvier 2019 à juillet de la même année, la moyenne en avril 2021 est de 10%).

✓ Variation de la CC en fonction du temps :

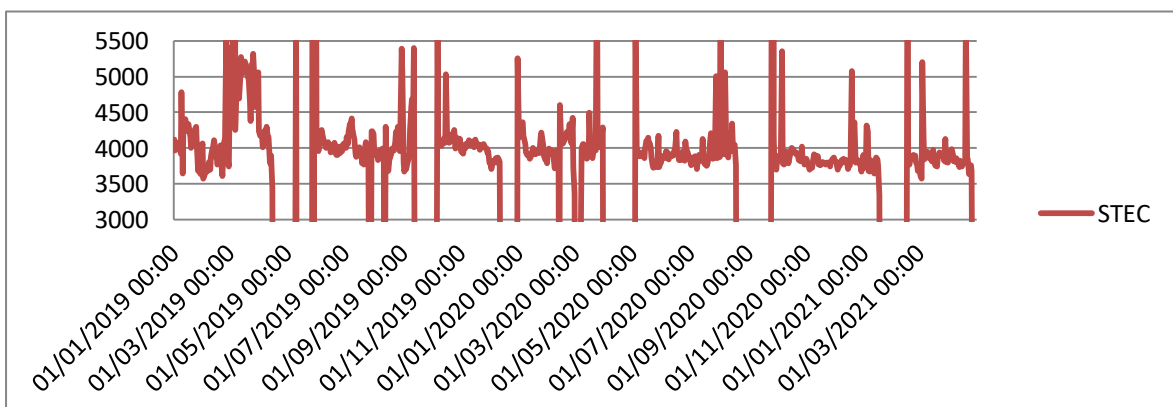


Figure 29: Diagramme de la variation de la CC en fonction du temps.

Interprétation :

D'après la courbe ci-dessus, on peut déduire que la consommation calorifique a subi une variation tout au long de ces trois années. Ce changement peut être expliqué par plusieurs facteurs qui sont déjà mentionnés dans la partie précédente ; les plus importants sont : les modules du cru (FSC, MS et MAF) et la granulométrie du cru.

✓ Variation de la CC et de la finesse du cru en fonction du temps :

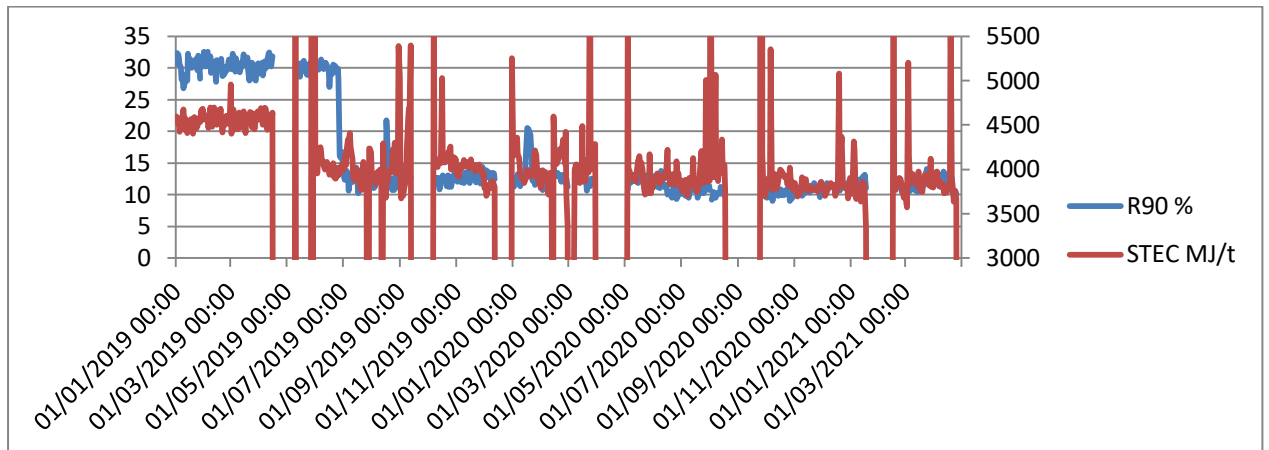


Figure 30 : Diagramme de la variation de la CC et la finesse cru en fonction du temps.

Interprétation :

La figure ci-dessus montre la relation entre la consommation calorifique et la granulométrie du cru. Selon la courbe lorsque les rejets augmentent, la consommation calorifique devient trop importante. Par conséquent, la CC diminue avec la réduction des rejets. Donc on peut dire que ces deux paramètres sont directement proportionnels et par conséquent, la finesse ou la granulométrie des matières premières influencent fortement la CC.

Chapitre 3 :

Résultats et discussions

Après avoir analysé les causes de la surconsommation calorifique, nous allons proposer les solutions sur quoi il faut agir pour avoir un bon niveau de performance en terme de la consommation calorifique.

1. Type de procédé :

La solution idéale pour réduire la CC est de disposer d'un procédé de la voie sèche, avec ou sans précalcination, dotée de préchauffage.

2. Fiabilité de fonctionnement des lignes de cuisson :

Pour améliorer la fiabilité de la disponibilité des installations, il faut les renforcer par des éléments mis en redondance qui, en cas de besoin, peuvent remplacer ceux défaillantes.

3. Soufflage du refroidisseur :

Si le débit d'air de refroidissement est augmenté, la température du clinker de sortie diminuera, mais la consommation calorifique nécessaire pour chauffer l'air augmentera. Par conséquent, le débit d'air de refroidissement doit être optimisé.

Le débit de refroidissement est lié à un autre paramètre qui influe directement le débit, à savoir la hauteur du lit de clinker. Par conséquent, pour assurer un bon débit de refroidissement, il faut intervenir sur la hauteur du lit. L'augmentation de la hauteur du lit de clinker conduit à une augmentation du temps de séjour de l'air de refroidissement dans le lit, donc l'échange thermique est amélioré, ce qui conduit à une diminution de la température de sortie du clinker.

4. Diminution des pertes thermiques :

L'emplacement d'un isolant thermique peut diminuer les pertes de chaleur au niveau des parois du four.

5. Minimiser les airs faux :

Si le niveau d'O₂ dépasse la valeur optimale, cela indique qu'il y a une fuite dans la canalisation, provoquant le passage d'un faux air, indiquant ainsi une surconsommation calorifique pour assurer la combustion. C'est un gaspillage de carburant pour la LafargeHolcim (LH). Par conséquent, l'objectif est de les réduire au maximum pour réduire la CC. Pour cette raison, il est nécessaire de s'assurer que l'étanchéité à l'air des équipements tels que le cyclone de la tour de préchauffage, les trappes de visite et les joints de tuyauterie est ajustée.

6. Optimisation de la phase liquide :

On déduit de ce qui précède qu'une augmentation du pourcentage de la phase liquide a été efficace pour diminuer la CC. Cependant une haute augmentation de ce pourcentage aura des effets contradictoires sur la CC. Donc il faut l'optimiser.

7. Optimisation du Taux de la fluorine :

Il faut optimiser le taux de la fluorine pour son prix élevé et pour ne pas nuire au processus de cuisson et finalement pour alléger la CC du four.

8. Modules du cru :

Il faut veiller à un dosage adéquat des trois modules dans le mélange pour ne pas dépasser la valeur optimale.

- Concernant le FSC il faut le diminuer pour ne pas dépasser sa valeur optimale afin de ne pas avoir de la chaux non combinée, ce qui favorise les réactions chimiques, entre la chaux et les oxydes de silice, d'aluminium et du fer.

- Il faut diminuer le taux du MS dans le but de faciliter la cuisson de la silice supplémentaire et donc diminuer la CC.

- En ce qui concerne le MAF, nous proposons de ne pas varier ce paramètre puisqu'il n'a pas d'impact sur la CC, donc c'est mieux de le garder stable.

9. Granulométrie du cru (partie économique) :

Dans cette partie économique, nous allons comparer le coût de la consommation calorifique entre les deux cas de granularité de la matière première pour déterminer lequel d'entre eux agit sur la CC en terme de coût.

Par conséquent, afin de résoudre ce problème, nous traiterons deux cas. Le premier cas est lorsque le pourcentage des rejets est égal à 30%, et le second cas lorsqu'il est égal à 10%. Nous allons comparer les changements de la CC dans les deux. Ces résultats seront présentés dans le tableau ci-dessous ; la figure 29 détermine l'effet de la taille des grains de la matière première sur la CC en fonction du temps.

Sachant que :

✓ Pour la STEC : 1 GJ vaut 30 Dh

Tableau 1: Comparaison entre les coûts dans les deux cas.

Les cas des rejets :	Cas 1 : % rejets=30 %	Cas 2 : % rejets=10 %
STEC :	= 4600 MJ = 4,6 GJ	= 3700 MJ = 3,7 GJ
Les coûts:	= 4,6 * 30 = 138 Dh	= 3,7 * 30 = 111 Dh

Interprétation :

En comparant le coût 1 et le coût 2, on conclut que lorsque le taux des rejets est réduit (c'est donc une matière première fine et bien broyée), la consommation calorifique sera réduite, et le coût sera également réduit.

Conclusion :

La granulométrie des matières premières a un impact direct sur la CC. Pour cette raison, l'usine doit s'efforcer de toujours maintenir un grain fin. Cette farine crue doit être bien moulue pour favoriser sa cuisson (qui produira du clinker de grande qualité). La farine crue doit sortir du broyeur avec une finesse de 90 µm. Si la granulométrie dépasse cette valeur, il y aura un taux élevé des rejets et une consommation calorifique excessive lors de la cuisson car dans ce cas les surfaces d'échanges thermiques diminuent, de sorte que le cru ne sera pas cuit, la demande de chaleur augmentera et les coûts de production de l'entreprise augmenteront, ce que l'entreprise essaie d'éviter. Par conséquent, la solution est de garder la matière première à grain fin.

D'autre part, il est nécessaire d'améliorer la consommation électrique, car si nous appliquons cette solution (réduction de la taille des particules), la consommation électrique augmentera, et le coût augmentera automatiquement (Figure 31). nous pouvons, donc, dire que si nous essayons de réduire le coût de la consommation calorifique, le coût de la consommation électrique va augmenter. Il faut alors savoir optimiser à la fois et en même temps, la taille de la matière première sans augmenter les coûts (d'énergie calorifique et électrique).



Figure 31 : Diagramme de la variation de la CE et la finesse cru en fonction du temps.

Conclusion générale

Etant donné que les cimenteries cherchent à alléger les coûts de la production en évitant la surconsommation énergétique, notre travail avait pour but de traiter les différents paramètres augmentant la CC et de trouver la meilleure configuration qui permettra de réduire la facture en énergie.

L'étude de la ligne de cuisson, qui engendre la consommation de la plus grande part de l'énergie, nous a permis d'extraire différents paramètres influant sur la CC.

Après l'examen de chacun de ces paramètres, nous avons constaté que des modifications au niveau du cru peuvent diminuer la CC et qui consistent en une :

- ✓ Augmentation de la finesse du cru.
- ✓ Amélioration des modules du cru (FSC, MS et MAF).
- ✓ Optimisation d'autres paramètres qui ont un effet secondaire comme : pertes thermiques, airs faux, soufflage du refroidisseur, la phase liquide et le taux de la fluorine...

Avant d'appliquer ces solutions, il est nécessaire de prendre en considération la consommation électrique qui est inversement proportionnelle à l'énergie thermique, et qu'il faut donc l'améliorer à son tour.

Ces actions ont pu réellement diminuer la consommation calorifique et par conséquent générer un gain au niveau de la facture énergétique.

Ce stage m'a permis d'améliorer mon esprit d'équipe et de compléter mes connaissances théoriques par une expérience pratique dans une société industrielle.

Résumé :

Le souci de toute cimenterie est d'optimiser sa consommation en énergie calorifique. En effet, la température de cuisson du clinker est très haute (1450 °C), ce qui demande une quantité d'énergie très importante et coûte cher aux cimenteries. Plusieurs paramètres influencent la consommation calorifique : le facteur de saturation en chaux, le module silicique, le module aluminoferrique la finesse du cru et sa composition chimique, les entrées d'air faux et les pertes de chaleur au niveau des parois du four. D'autres problèmes existent, causant des arrêts du four et coûtant énormément d'énergie calorifique lors du redémarrage du four. Il faut donc maintenir les paramètres de cuisson optimums tout en préservant une bonne qualité du produit final et en allégeant la facture énergétique.

Après l'examen de chacun des paramètres précédents, nous trouvons que le broyage non maîtrisé du cru augmente cette consommation. La composition du cru en alumine et oxyde de fer (phase liquide) diminue la consommation calorifique. Nous proposons aussi de diminuer les entrées des airs faux par un soudage des fuites dans les conduites, l'emplacement d'un isolant thermique peut diminuer les pertes de chaleur au niveau des parois du four et finalement il faut garder une valeur optimale de la granulométrie du cru (90µm) pour alléger à la fois le coût de l'énergie calorifique et électrique.

Mots clés :

Le cru, la clinkérisation, le ciment, la consommation calorifique et la ligne de cuisson.

Références bibliographiques :

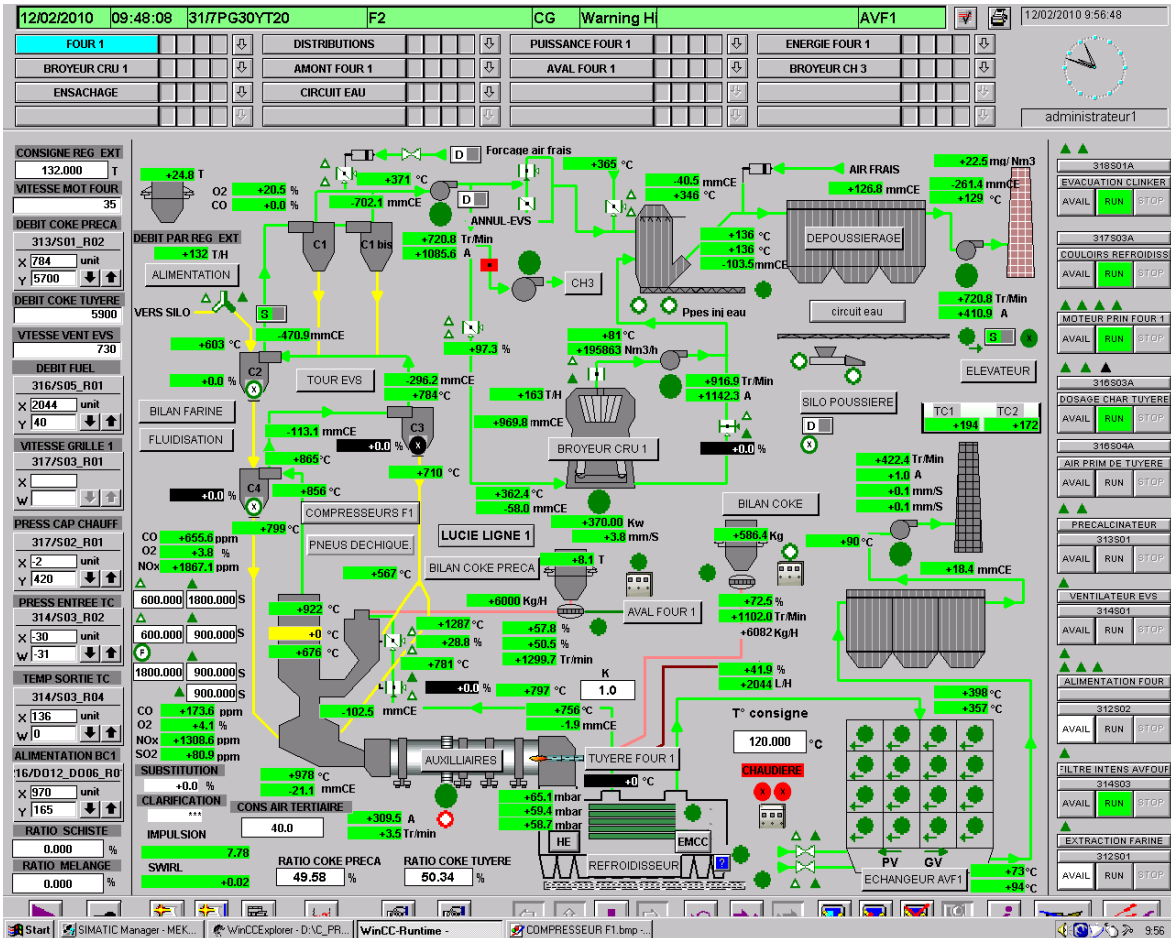
- * Documents internes de la société.
- * Les anciens rapports de stage.

Webographie :

- * www.lafarge.ma
 - * www.lafarge-na.com
 - * <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10981>
-

Annexe 1:

Schéma du processus de la cuisson obtenue par la salle de contrôle de LafargeHolcim
Mekhnès.



Annexe 2 :